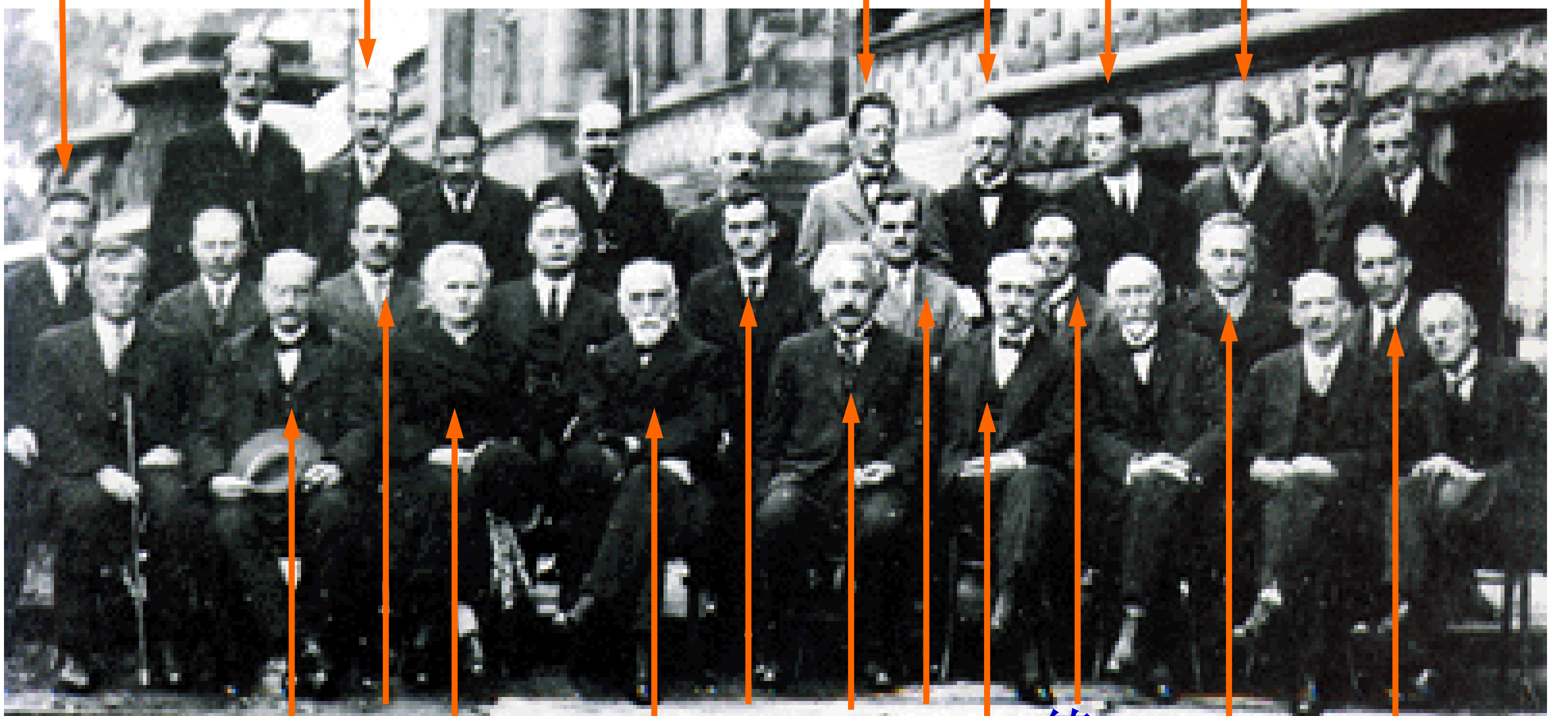
量子概念是 1900 年普朗克首先提出，距今已有 100 多年的历史. 其间，经过爱因斯坦、玻尔、德布罗意、玻恩、海森伯、薛定谔、狄拉克等许多物理大师的创新努力，到 20 世纪 30 年代，就建立了一套完整的量子力学理论.

1927年10月在布鲁塞尔召开了第五次索尔维会议



光的波粒二象性

（1）波动性：光的干涉和衍射

（2）粒子性：$E = h\nu$（光电效应等）

- 相对论能量和动量关系

$$\boxed{\vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c} = \frac{\vec{p}c}{E}}$$

$$\boxed{E^2 = E_0^2 + p^2c^2}$$

◆ 光子

$$v = c \qquad E = pc \qquad m_0 = 0$$

$$E = h\nu \qquad p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

描述光的**粒子性**

$$\left\{\begin{aligned} E &= h\nu \\ p &= \frac{h}{\lambda} \end{aligned}\right\}$$

描述光的**波动性**

一 黑体 黑体辐射

1 热辐射的基本概念

（1）单色辐射出射度 单位时间内从物体单位表面积发出的频率在 ν 附近单位频率区间内的电磁波的能量.

$M_{\nu}(T)$ 单位：$\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}}$

$M_{\lambda}(T)$ 单位：$\mathrm{W\cdot m^{-3}}$

（2）辐射出射度

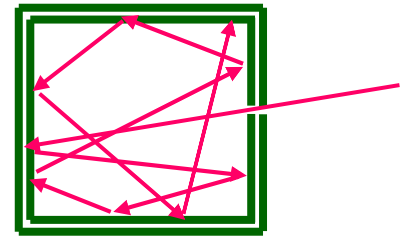
单位时间，单位面积上所辐射出的各种频率（或各种波长）的电磁波的能量总和.

$$M(T)=\int_0^{\infty} M_{\nu}(T)\mathrm{d}\nu$$

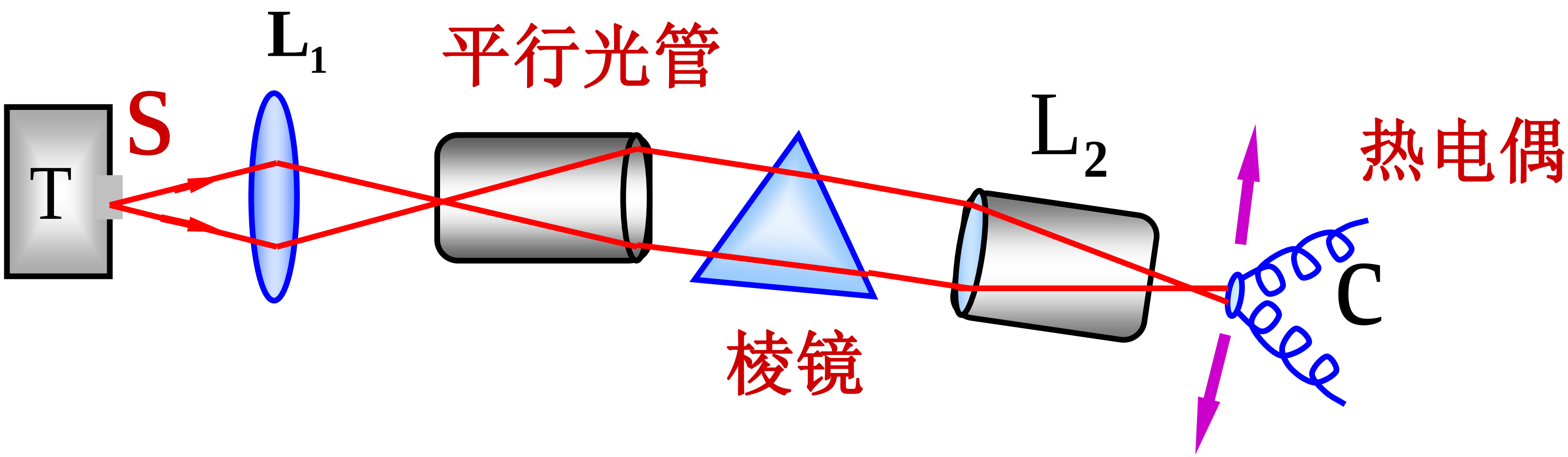
$$M(T)=\int_0^{\infty} M_{\lambda}(T)\mathrm{d}\lambda$$

2 黑体

- 吸收一切外来电磁辐射
- 空腔小孔口的表面



黑体是理想模型



二 黑体辐射的实验规律

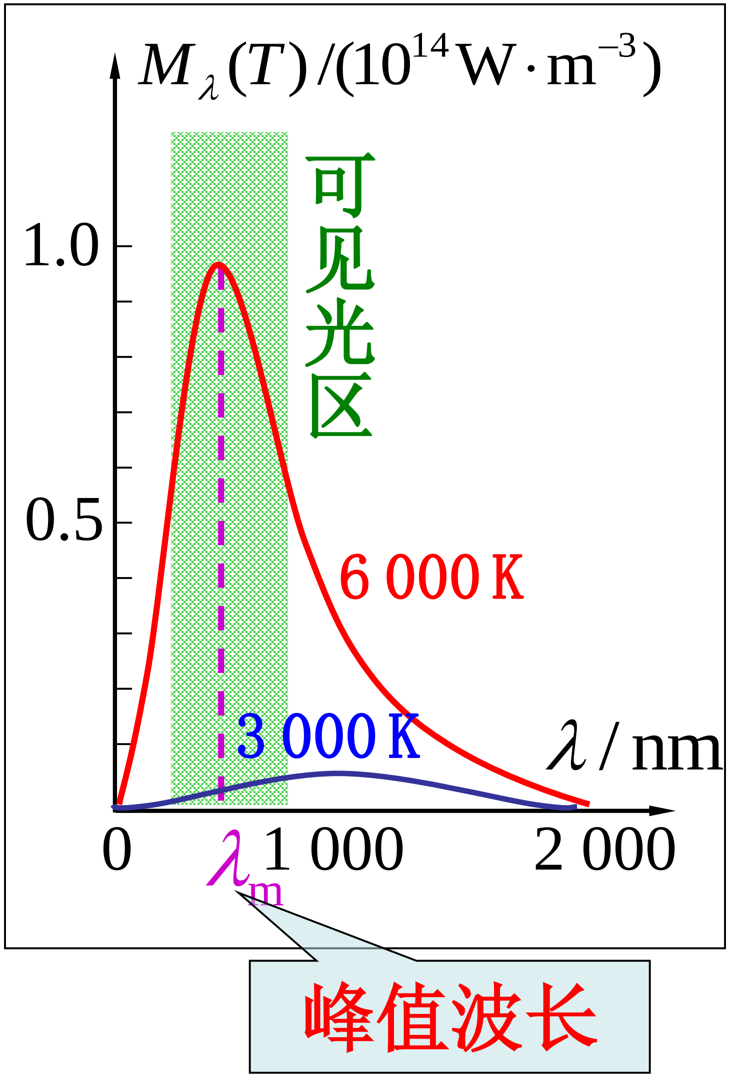
1 斯特藩 - 玻耳兹曼定律

总辐出度

$$\boxed{M(T) = \int_0^{\infty} M_\lambda(T)\mathrm{d}\lambda = \sigma T^4}$$

斯特藩 - 玻耳兹曼常数

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$$



2 维恩位移定律

$$\boxed{\lambda_m T = b}$$

常量 $b = 2.898 \times 10^{-3} \ \mathrm{m \cdot K}$

例1（1） 温度为 $20^{\circ}\mathrm{C}$ 的黑体，其单色辐出度的峰值所对应的波长是多少？**(2)** 太阳的单色辐出度的峰值波长 $\lambda_{\mathrm{m}}=483\ \mathrm{nm}$，试由此估算太阳表面的温度. **（3）** 以上两辐出度之比为多少？

解 **（1）** 由维恩位移定律

$$\lambda_{\mathrm{m}}=\frac{b}{T_1}=\frac{2.898\times10^{-3}}{293}\ \mathrm{nm}=9\,890\ \mathrm{nm}$$

（2） 由维恩位移定律

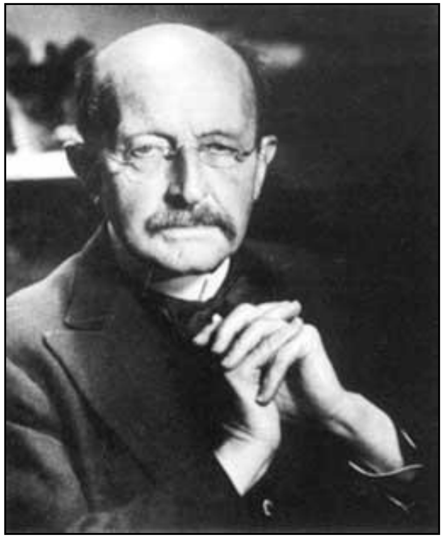
$$T_2=\frac{b}{\lambda_{\mathrm{m}}}=\frac{2.898\times10^{-3}}{483\times10^{-9}}\mathrm{K}\approx 6\,000\ \mathrm{K}$$

（3）由斯特藩 – 玻耳兹曼定律

$$M(T_2)/M(T_1)=(T_2/T_1)^4=1.76\times10^5$$

普朗克（1858 — 1947）

德国理论物理学家，量子论的奠基人. 1900年12月14日他在德国物理学会上，宣读了以《关于正常光谱中能量分布定律的理论》为题的论文，提出了能量的量子化假设. 劳厄称这一天是“量子论的诞生日”.



量子论和相对论构成了近代物理学的研究基础.

四 普朗克假设 普朗克黑体辐射公式

1 普朗克黑体辐射公式

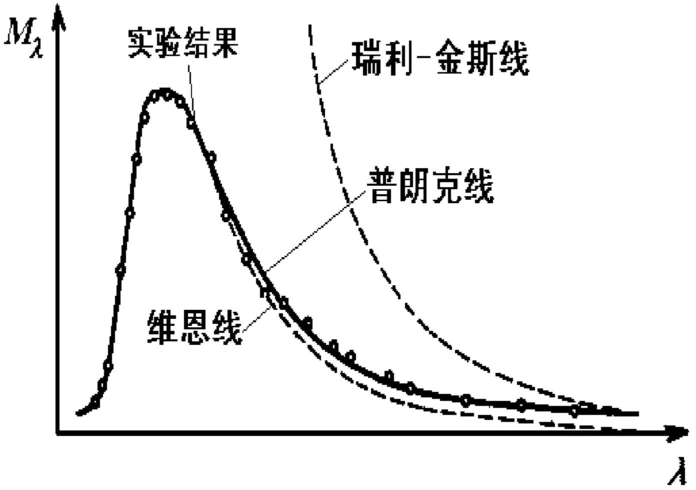
$$M_{\nu}(T)\mathrm{d}\nu = \frac{2\pi h}{c^2}\frac{\nu^3\mathrm{d}\nu}{\mathrm{e}^{h\nu/kT}-1}$$

紫外灾难

能量均分定理失败

普朗克常数

$$h = 6.63\times10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}$$



2 普朗克量子假设

黑体中的分子、原子的振动可看作谐振子，这些谐振子的能量状态是分立的，相应的能量是某一最小能量的整数倍, 即ε，2 ε，3 ε， … $n\varepsilon$，ε称为能量子，n 为量子数.

$$\varepsilon = nh\nu \quad (n = 1,2,3,\cdots)$$

普朗克量子假设是量子力学的里程碑.

例2 设一音叉尖端质量为 0.050 kg，将其频率调到 $\nu=480\ \mathrm{Hz}$，振幅 $A=1.0\ \mathrm{mm}$.

求（1）尖端振动的量子数；

（2）当量子数由 n 增加到 $n+1$ 时，振幅的变化是多少？

解（1）$E=\dfrac{1}{2}m(2\pi\nu)^2A^2=nh\nu \qquad n=7.13\times10^{29}$

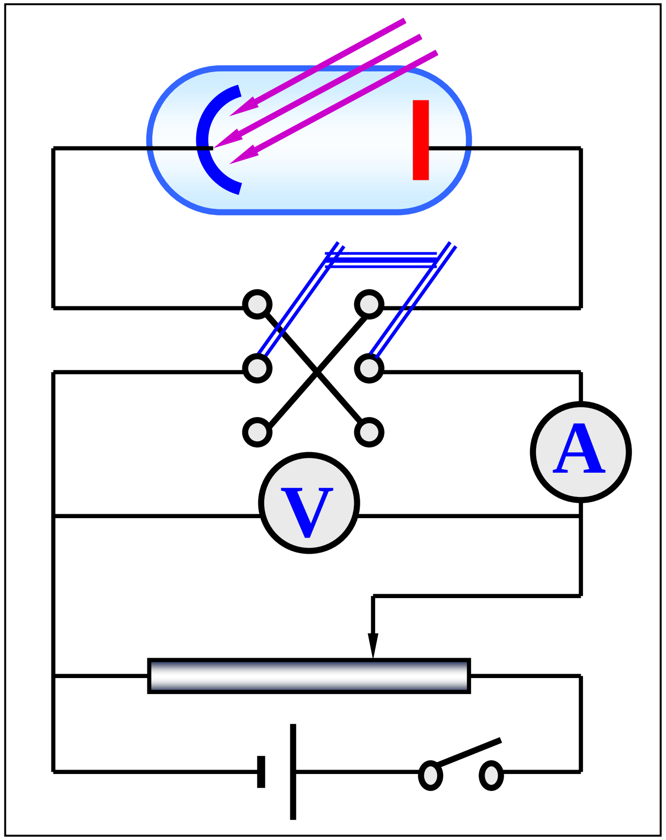
基元能量 $h\nu=3.18\times10^{-31}\mathrm{J}$ 能量准连续

（2）$2A\mathrm{d}A=\dfrac{h}{2\pi^2 m\nu}\mathrm{d}n \qquad \Delta A=\dfrac{\Delta n}{n}\dfrac{A}{2}$

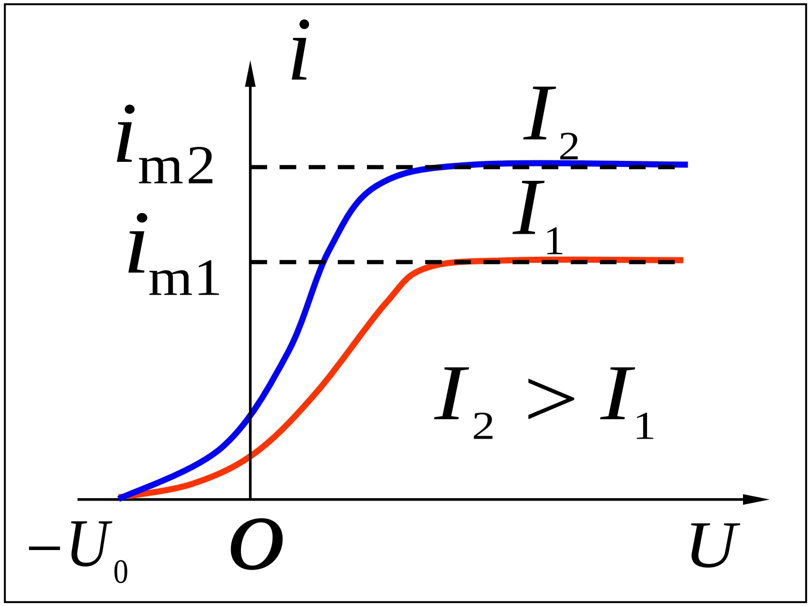
$\Delta n=1 \qquad \Delta A=7.01\times10^{-34}\mathrm{m}$

一 光电效应实验规律

1 实验装置及现象



2 实验规律



二　光子　爱因斯坦方程

1　“光量子”假设

光束可看成是由光子组成的粒子流，单个光子的能量为 $\varepsilon = h\nu$;对给定频率的光束来说，光子的数目越多，光的强度越大.

2　爱因斯坦光电效应方程

$$\boxed{h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W}$$

逸出功与材料有关

几种金属逸出功的近似值(eV)

钠	铝	锌	铜	银	铂
2.46	4.08	4.31	4.70	4.73	6.35

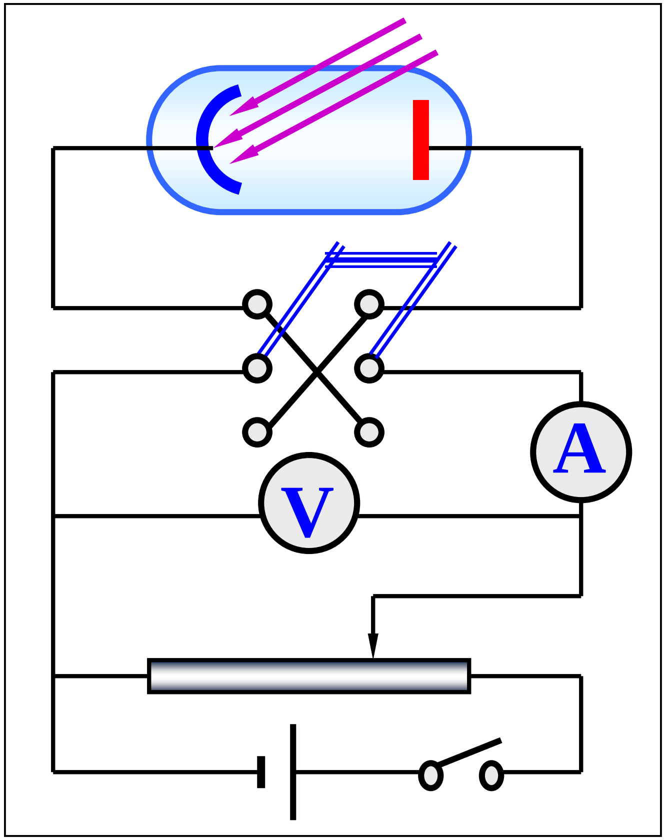
理论解释:

◆ 光强越大，光子数越多，单位时间内产生光电子数目越多,光电流越大.（$\nu > \nu_0$ 时）

遏止电势差

外加反向的遏止电势差 U_0 恰能阻碍光电子到达阳极，即

$$eU_0 = \frac{1}{2}mv^2$$



◆ **频率限制:** 只有 $\nu \geq \nu_0$ 时才会发生

$$W = h\nu_0 \qquad \nu_0 = W/h$$（截止频率）

◆ **瞬时性：** 光子射至金属表面， 一个光子的能量 $h\nu$ 将一次性被一个电子吸收，若 $\nu > \nu_0$， 电子立即逸出，无需时间积累.

爱因斯坦的光子理论圆满地解释了光电效应现象.

3 普朗克常数的测定

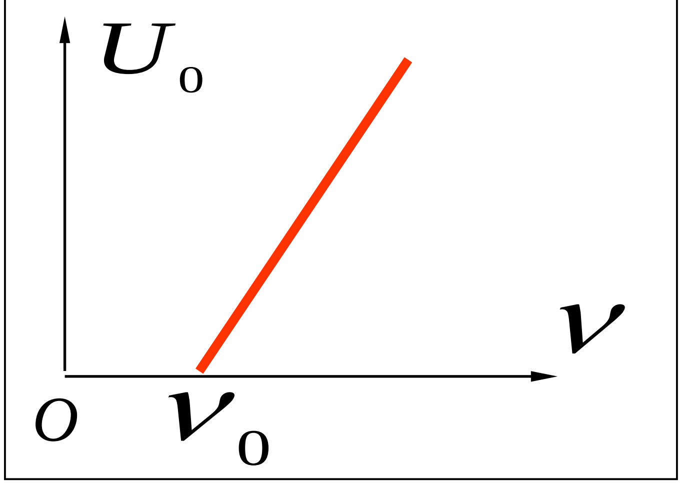
$$h\nu=\frac{1}{2}mv^2+W$$

$$h\nu=eU_0+W$$

$$U_0=\frac{h}{e}\nu-\frac{W}{e}$$

$$\Delta U_0/\Delta\nu=h/e$$

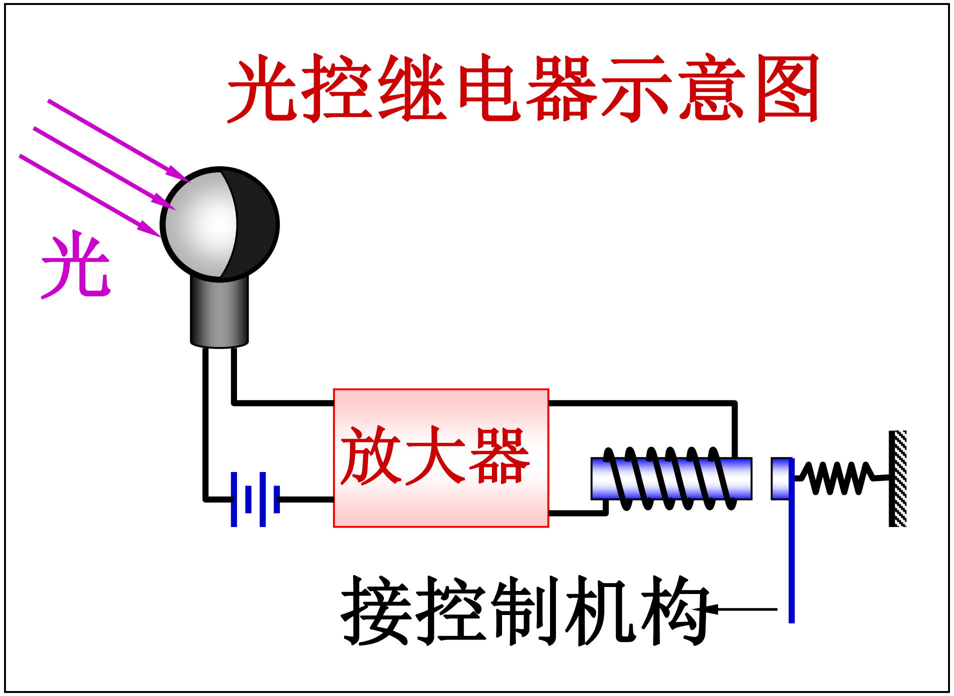
遏止电势差和入射光频率的关系



$$h=\frac{\Delta U_0}{\Delta\nu}e$$

三 光电效应在近代技术中的应用

光控继电器、自动控制、自动计数、自动报警等.



光电倍增管

例1 一半径为 $1.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}$ 的薄圆片，距光源1.0 m．光源的功率为1W，发射波长589 nm的单色光．假定光源向各个方向发射的能量是相同的，试计算在单位时间内落在薄圆片上的光子数．

解 $S=\pi\times(1.0\times10^{-3}\,\mathrm{m})^2=\pi\times10^{-6}\,\mathrm{m}^2$

$$E=P\frac{S}{4\pi r^2}=2.5\times10^{-7}\ \mathrm{J\cdot s^{-1}}$$

$$E = P\frac{S}{4\pi r^2} = 2.5\times10^{-7}\ \mathrm{J\cdot s^{-1}}$$

$$N = \frac{E}{h\nu} = \frac{E\lambda}{hc} = 7.4\times10^{11}\ \mathrm{s^{-1}}$$

例2. 用波长 $\lambda=410$ nm 的单色光照射某金属表面，若产生的光电子的最大动能E_k=1.00eV，试求能使该金属发生光电效应的入射光的最大波长是多少？

解： $$h\nu = E_{k,\max} + W$$

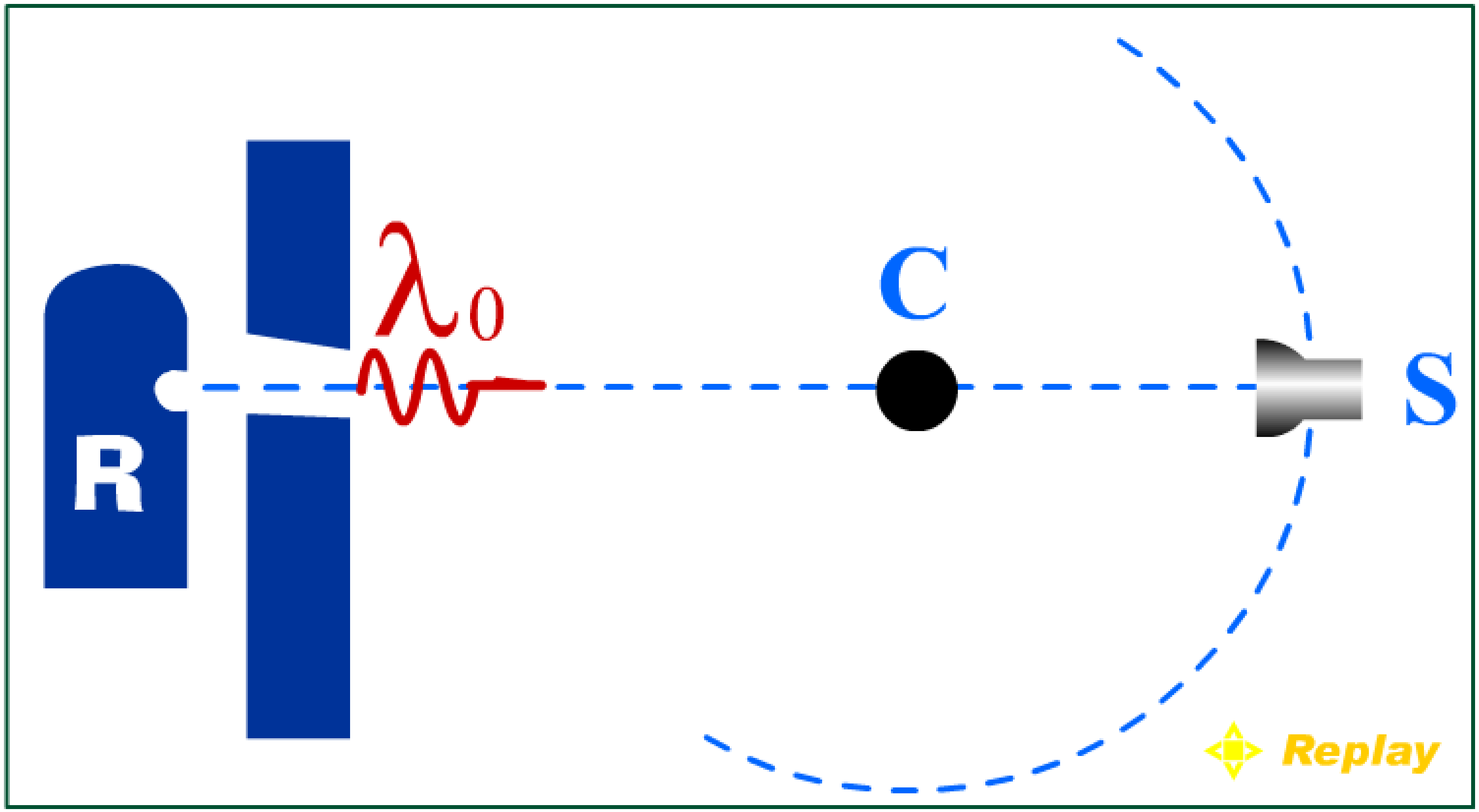
$$W = \frac{hc}{\lambda} - E_{k,\max}$$

$$= \frac{1240}{410} - 1.00 = 2.024eV$$

$$\lambda_0 = \frac{hc}{W} = \frac{1240}{2.024} = 612.6nm$$

1920年，美国物理学家康普顿在观察 X 射线被物质散射时，发现散射线中含有波长发生了变化的成分——散射束中除了有与入射束波长 λ_0 相同的射线，还有波长 $\lambda > \lambda_0$ 的射线.

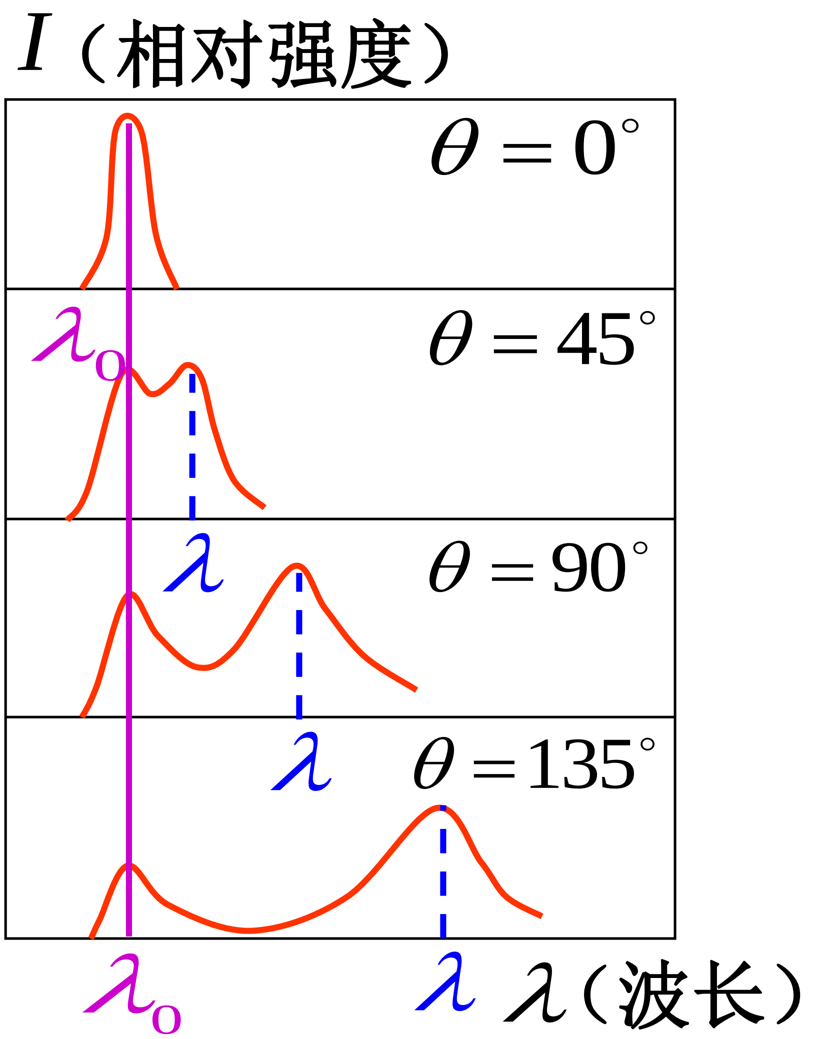
一 实验装置



二　实验结果

1 波长的偏移（$\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$）与散射角有关.

2 $\Delta\lambda$ 与散射物体无关.



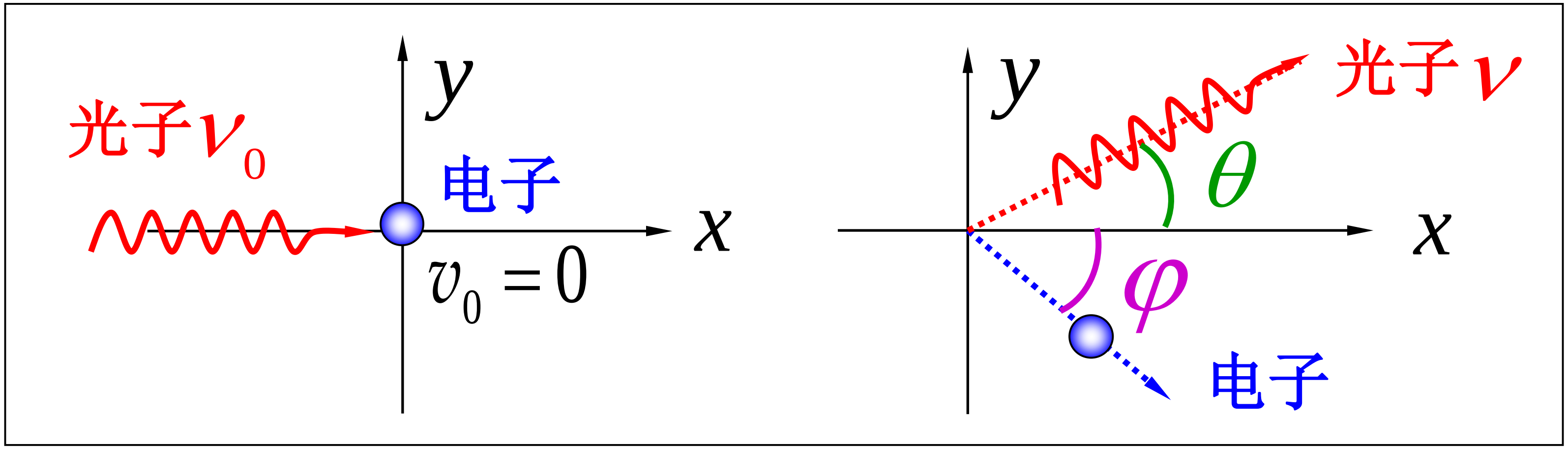
三　经典理论的困难

按经典电磁理论，带电粒子受到入射电磁波的作用而发生受迫振动，从而向各个方向辐射电磁波，散射束的频率应与入射束频率相同，带电粒子仅起能量传递的作用.

可见，经典理论无法解释波长变长的散射线.

四　量子解释

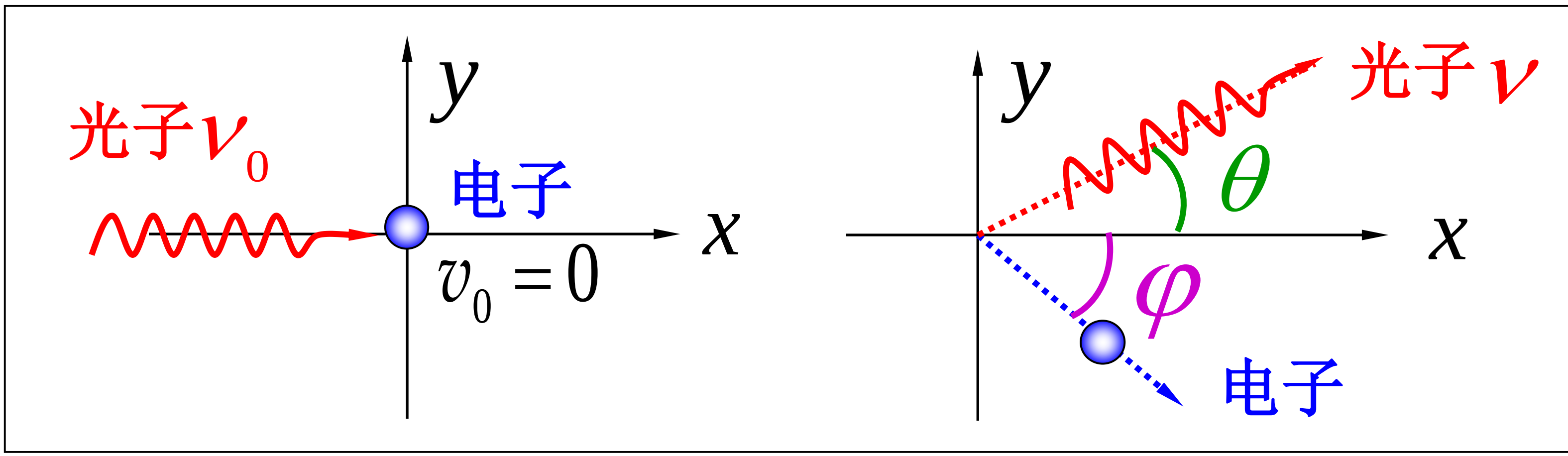
1　物理模型



- 入射光子（ X 射线或 γ 射线）能量大．

$E = h\nu$　　范围为：$10^4 \sim 10^5\,\mathrm{eV}$

- 电子热运动能量 $\ll h\nu$ ，可近似为静止电子.



- 固体表面电子束缚较弱，视为近自由电子.
- 电子反冲速度很大，用相对论力学处理.

2 定性分析

(1) 入射光子与散射物质中束缚微弱的电子弹性碰撞时，一部分能量传给电子，散射光子能量减少，频率下降、波长变大.

(2) 光子与原子中束缚很紧的电子发生碰撞，近似与整个原子发生弹性碰撞时，能量不会显著减小，所以散射束中出现与入射光波长相同的射线.

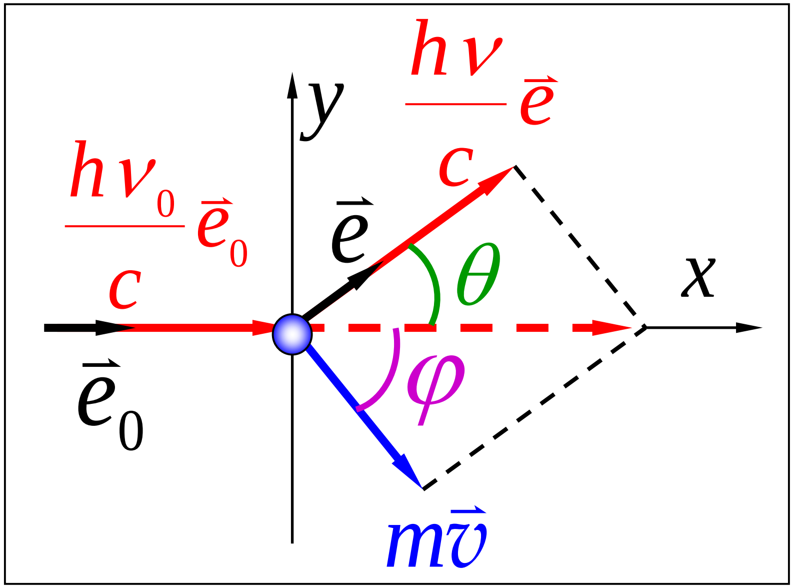
3 定量计算

能量守恒

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$$

动量守恒

$$\frac{h\nu_0}{c}\vec{e}_0 = \frac{h\nu}{c}\vec{e} + m\vec{v}$$



$$m^2v^2=\frac{h^2\nu_0^2}{c^2}+\frac{h^2\nu^2}{c^2}-2\frac{h^2\nu_0\nu}{c^2}\cos\theta$$

$$m^2c^4(1-\frac{v^2}{c^2})=$$

$$m_0^2c^4-2h^2\nu_0\nu(1-\cos\theta)+2m_0c^2h(\nu_0-\nu)$$

$$m=m_0(1-v^2/c^2)^{-1/2}$$

$$\frac{c}{\nu}-\frac{c}{\nu_0}=\frac{h}{m_0c}(1-\cos\theta)=\lambda-\lambda_0=\Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\theta) = \frac{2h}{m_0 c}\sin^2\frac{\theta}{2}$$

- 康普顿波长 $\lambda_C = \dfrac{h}{m_0 c} = 2.43\times 10^{-12}\ \mathrm{m}$

- 康普顿公式

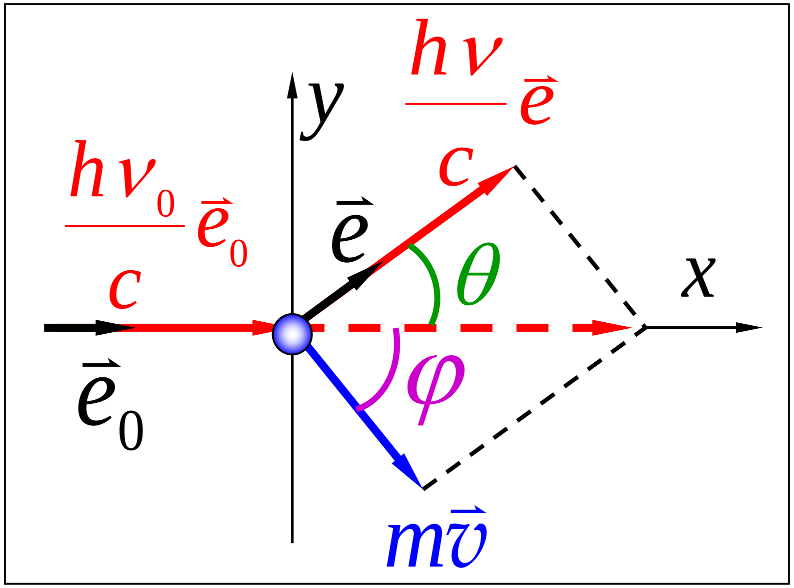
$$\boxed{\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\theta) = \lambda_C(1-\cos\theta)}$$

4 结论

- 散射光波长的改变量 $\Delta\lambda$ 仅与 θ 有关.

$$\theta = 0, \Delta\lambda = 0$$

$$\theta = \pi, \quad (\Delta\lambda)_{\max} = 2\lambda_{\mathrm{C}}$$



- 散射光子能量减小

$$\lambda > \lambda_0, \nu < \nu_0$$

5 讨论

◆ 光具有波粒二象性

一般而言，光在传递过程中，波动性较为显著；光与物质相互作用时，粒子性比较显著.

◆ 若 $\lambda_0 >> \lambda_C$ 则 $\lambda \approx \lambda_0$，可见光观察不到康普顿效应.

- $\Delta\lambda$ 与 θ 的关系与物质无关， 是光子与近自由电子间的相互作用.

- 散射中 $\Delta\lambda = 0$ 的散射光是因光子与紧束缚电子的作用. 原子量大的物质，其电子束缚较强，因而康普顿效应不明显.

6　物理意义

- 光子假设的正确性，狭义相对论力学的正确性 .

- 微观粒子的相互作用也遵守**能量守恒**和**动量守恒**定律.

例1 波长 $\lambda_0 = 1.00\times10^{-10}\ \mathrm{m}$ 的 X 射线与静止的自由电子作弹性碰撞，在与入射角成 90° 角的方向上观察，**问：**

（1） 散射波长的改变量 $\Delta\lambda$ 为多少？

（2） 反冲电子得到多少动能？

（3） 在碰撞中，光子的能量损失了多少？

解

（1） $\Delta\lambda = \lambda_C(1-\cos\theta) = \lambda_C(1-\cos 90^\circ) = \lambda_C$

$$= 2.43\times 10^{-12}\,\mathrm{m}$$

（2） 反冲电子的动能

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_0}(1-\frac{\lambda_0}{\lambda}) = 295\,\mathrm{eV}$$

（3） 光子损失的能量＝反冲电子的动能